
ONDE DI MARE E DI LAGO.**ALFREDO POCHETTINO.**

Rapporto letto nella Sezione II del Congresso della Società per il Congresso delle Scienze
in Parma.

I. Introduzione.

1. La complessità del fenomeno, la grande varietà di teorie, tutte di grande complicazione e solo approssimate, l'abbondanza di osservazioni ed esperienze, per lo più frammentarie, poco ordinate e discordi, presentano grandi difficoltà al tentativo di riassumere entro i brevi limiti di un rapporto i risultati della teoria, dell'esperienza e dell'osservazione sul moto ondoso. Così i rapporti e le note presentati sull'argomento nelle riunioni dell'Associazione Britannica sono limitati ad una parte sola dello studio delle onde: o alla parte teorica, come il noto rapporto di Stokes, o alla parte sperimentale, come quello di Scott Russel, o infine a quella riassuntiva delle osservazioni, come le note del Cornish.

Malgrado l'interesse che il fenomeno delle onde del mare ha sempre destato in chiunque si appassioni all'indagine dei fenomeni naturali, grande è l'imperfezione delle nostre nozioni sul moto ondoso; ciò dipende forse, oltre che dalla difficoltà intrinseca del fenomeno, anche dal fatto che teorici, osservatori e sperimentatori hanno proceduto nei loro studi troppo indipendentemente gli uni dagli altri: i primi costringendo le loro indagini in condizioni che non si verificano nella realtà, sacrificando così all'eleganza analitica della trattazione la praticità dei risultati; i secondi, naviganti per lo più, osservando i fenomeni del moto ondoso da un punto di vista pratico e considerando quindi gli elementi che avrebbero giovato alla teoria come cose di secondaria importanza; i terzi infine, eccettuati forse i fratelli Weber, limitandosi a verificare tutta o in parte una teoria, non uscendo quindi dalle condizioni imposte da questa, e radunando così un materiale che presenta grandi lacune anch'esso.

In questo Rapporto, lasciando da parte l'onda-marea propriamente detta, l'unica per la quale si abbia una teoria progredita e un buon materiale d'osservazione, e le onde capillari come quelle che solo in minima parte interessano la fisica terrestre, io mi limiterò al tentativo di presentare, come m'è possibile, lo stato attuale delle nostre conoscenze sul moto ondoso nei mari e nei laghi esponendo in seguito alcuni dei problemi ancora da risolvere, lieto se quanto verrò esponendo invoglierà qualcuno ad occuparsi di questi studi, il cui iniziatore è gloria italiana: Leonardo da Vinci.

II. *Onde progressive.*

2. Dei tre strumenti d'indagine offerti dalla scienza per lo studio dei fenomeni naturali: teoria, osservazione ed esperienza, il primo usato, come di solito logicamente avviene nella storia delle investigazioni scientifiche, fu l'osservazione (Leonardo da Vinci), seguì la teoria (Newton), ultima fu l'esperienza (Flaugergues); a questi primi studi seguono: per la parte sperimentale, le ricerche dei fratelli Weber, di Bidone, di Lechat, ecc. e per la parte d'osservazione le numerose misure effettuate in mare dai vari esploratori, specie nei primi viaggi di circumnavigazione, e da coloro che si occuparono dei problemi dei porti di rifugio e delle costruzioni navali. Dal punto di vista teorico il problema delle onde presenta grande interesse perchè è la prima questione d'idrodinamica che sia stata trattata sistematicamente sulle basi delle equazioni generali: lasciando da parte i primi tentativi di Bernoulli, Laplace ecc., nei quali non si fa ancora distinzione fra onde progressive e stazionarie, il primo studio teorico importante è quello di Lagrange, nel quale sono stabilite le equazioni fondamentali del moto: i risultati valgono però solo per onde basse in acqua bassa; seguono i lavori di Poisson e Cauchy sulle onde prodotte in un liquido per l'immersione o la emersione di un solido di forma determinata; lavori recentemente riassunti con incomparabile genialità dal Lamb, nei quali s'inizia la vera trattazione analitica del problema col l'uso di ingegnosi processi di approssimazioni successive, me-

todi ulteriormente adoperati, perfezionati ed estesi dal Thomson, dal Helmholtz, dal Lamb, dal Rayleigh, dal Wien, dal Burnside, dal Boussinesq, ecc.

È inutile qui approfondire lo studio di tutto questo materiale teorico, poichè per la massima parte non si riferisce alle onde che interessano la fisica terrestre; limitiamoci quindi ad esporre solo quanto queste onde riguarda.

Anche volendo lasciar da parte lo studio dello stadio iniziale sia per quel che riguarda le cause, sia per quello che riguarda la propagazione del moto dalla superficie del mare agli strati inferiori, e la questione della stabilità delle onde, problemi da riguardarsi, malgrado gli studi del Lamb e del Thomson, ancora come insoluti, le difficoltà teoriche fondamentali sono principalmente due: la prima dipende dal fatto ormai assodato (Cialdi) che non sussiste nel moto ondoso, come avviene generalmente in natura, la netta distinzione necessaria alla semplificazione del problema nelle ricerche teoriche, fra movimenti con sola propagazione di forma (onde) e movimenti con solo trasporto di massa (correnti); la seconda sta nel trovare una forma d'onda che soddisfi alla condizione della pressione costante alla superficie libera dell'acqua. Il Wien arriva infatti a domandarsi se realmente esista una forma d'onda per cui questa condizione sia rigorosamente soddisfatta, e la quale sia quindi capace di progredire inalterata; infatti non apparisce (Abercromby) sussistere in natura l'inalterabilità della forma, sebbene non si conosca come questa eventuale modificazione avvenga.

La teoria delle onde più importante per la fisica terrestre è quella detta *trocoidale*, fondata dal Gerstner, discussa da Stokes e da Merrifield, perfezionata e completata da Airy, Hagen, Beech, Bertin, Boussinesq e Rayleigh. Secondo questa teoria, come è noto, le particelle del liquido descrivono, con moto uniforme e in piani normali alla cresta dell'onda, delle orbite circolari di raggio decrescente in progressione geometrica colla profondità, e tra le particelle, aventi i loro centri d'orbita su due verticali distinte, esiste sempre una differenza di cammino angolare proporzionale alla distanza fra le due verticali stesse; la forma del profilo sarebbe quindi trocoidale

e, come caso limite, cicloidale. Fra la velocità V di propagazione, la lunghezza d'onda λ , e la profondità h dell'acqua, sussiste la relazione :

$$V^2 = \frac{g\lambda}{2\pi} \operatorname{tang hyp} \frac{2\pi h}{\lambda};$$

quindi :

$$\text{per } \frac{h}{\lambda} \text{ molto grande : } V = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}},$$

$$\text{per } \frac{h}{\lambda} \text{ molto piccolo : } V = \sqrt{gh},$$

donde si deduce che la velocità di propagazione dipende solo dalla lunghezza d'onda, in acqua molto profonda, e solo dalla profondità dell'acqua, in acqua bassa.

Questa teoria definisce una forma d'onda per la quale la condizione della costanza delle pressioni alla superficie è soddisfatta; ad essa però si possono muovere alcune obbiezioni teoriche e pratiche: il Wien osserva infatti essere dubbia la possibilità di un'onda simile, in primo luogo per la natura dei movimenti assegnati alle particelle, che non sono vere rotazioni, e poi perchè le onde naturali avvengono in realtà non già su una superficie libera, ma alla superficie limite fra acqua ed aria e quindi dovrebbero produrre in quest'ultimo mezzo dei movimenti che in realtà non si verificano. L'orbite poi descritte dalle particelle liquide non sono quasi mai cerchi od ellissi, ma delle curve più o meno ovali, e solo in casi rarissimi chiuse: di più il piano dei centri di queste orbite, che è a metà strada fra le creste e i cavi delle onde, non è il piano livello medio dell'acqua in quiete, ma è più alto di questo perchè la cresta è sempre più acuta del cavo.

Delle varie specie di onde progressive che possono generarsi nel mare o nei laghi, le più importanti per la fisica terrestre sono: le onde di vento, le onde libere o residue e le onde solitarie.

3. *Onde di vento.* Il primo elemento di queste onde sono le onde capillari prodotte dal vento (intensità di almeno $0,2 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$)

sulla superficie calma del mare; la presenza di queste onde si rileva subito perchè, là ove esse si formano, il mare perde quel suo riflesso biancastro che suggerisce il paragone con una superficie d'olio, ed assume una tinta azzurra scura. Queste prime onde hanno un andamento irregolare a seconda del vento e sono accompagnate da un moto di traslazione in avanti dello strato d'acqua superficiale; quindi le orbite descritte dalle particelle non sono certamente curve chiuse. Queste onde, appena prodotte, danno presa al vento che le sospinge in avanti; ne seguono così un aumento della velocità dell'onda, cui corrisponde un allungamento dell'onda stessa, ed un aumento della velocità delle particelle sulla cresta cui corrisponde un aumento del diametro dell'orbita, cioè dell'altezza delle onde; le dimensioni definitive di queste dipendono, come è ovvio, dal tiro (velocità \times durata) del vento e dalla vastità e profondità del bacino d'acqua in cui si formano; il limite di stabilità nella forma dell'onda è dato dalla forma quasi cicloidale, poi l'onda si frange. Questo frangersi delle onde può prodursi anche per altre ragioni: per urto contro una parete scogliosa ripida, o per arrivo dell'onda su una spiaggia debolmente inclinata, per interferenza fra due sistemi di onda, o per contrasto fra una serie di onde ed una corrente.

La trattazione teorica delle onde di vento è stata tentata dall' Helmholtz e dal Wien, partendo dal problema delle onde alla superficie limite fra due fluidi. Da questa teoria discenderebbe che a velocità di vento maggiore e a velocità d'onda minore corrispondono creste d'onda più tondeggianti e viceversa; moltissimi osservatori sostengono il contrario, ma, siccome l'osservazione della forma delle onde in mare aperto non è facile, il Wien crede poter ritenere che non sia ancora dimostrata una contraddizione fra i risultati teorici e i dati d'osservazione. Nel caso di onde non troppo alte, chiamando V la velocità di propagazione delle onde, v la velocità del vento, r il rapporto fra la densità dell'aria e dell'acqua, e

ponendo $s = \frac{1}{\text{tang hyp } \frac{2\pi h}{\lambda}}$ si ha:

$$V = \frac{rv \mp \sqrt{(1-r)(r+s) \frac{g\lambda}{2\pi} - v^2 r s}}{r+s},$$

se $v=0$, avremo come velocità delle onde in aria calma:

$$V_0 = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{r} - 1\right) \frac{g\lambda}{2\pi}}}{1 + \frac{s}{r}}.$$

Potremo allora scrivere:

$$V = \frac{vr}{r+s} \mp \sqrt{V_0^2 - \frac{v^2 r s}{(r+s)^2}},$$

ossia: un vento contrario diminuisce la velocità delle onde. Con un vento in favore tale che $v > 2V_0$ le onde stesse si muovono più lentamente che in aria calma e viceversa.

Se:

$$v > V_0 \sqrt{1 + \frac{s}{r}},$$

allora V non può diventare minore di zero e non possono sussistere onde di lunghezza data che vadano contro vento.

In acqua molto bassa s tende a zero e purchè la velocità del vento non sia tale da rendere instabili le onde non importa se il vento stesso sia favorevole o contrario; in questo caso facendo $v=0$ abbiamo:

$$V = V_0 = \sqrt{(1-r)hg},$$

e le onde basse si muovono più lentamente in aria quieta che se questa non ci fosse.

Di tutte queste leggi importantissime manca del tutto la verifica sui dati d'osservazione.

4. *Onde libere.* Le onde sorte sotto l'influenza del vento, ed osservate ancora in questo stadio di dipendenza, sono come una specie di onde forzate; ora può darsi che il moto ondoso si conservi anche molto tempo dopo cessato il vento che l'ha

generato; oppure, data la grande velocità di propagazione, può darsi che un sistema di onde arrivi facilmente in regioni lontane dal suo punto d'origine e che per conto loro sarebbero in quiete o avrebbero moto ondoso diverso. Queste onde libere, o senza vento, osservate per la prima volta nel Mediterraneo da Aristotile e nell'Oceano da Cristoforo Colombo durante il suo primo viaggio, hanno un profilo diverso da quello delle onde di vento; mentre queste s'avvicinano molto alla forma cicloidale, quelle presentano una cresta tondeggiante a profilo trocoidale teso e sono in generale di altezza minore. Specialmente menzionate dai naviganti sono le onde libere regolarissime che si presentano nelle zone ai limiti dei Monsoni e degli Alisei; nei mari piccoli il fenomeno sarà certo meno marcato, ma mancano completamente osservazioni in proposito.

5. *Onde solitarie* L'onda solitaria, studiata per la prima volta sperimentalmente da Scott Russel, consiste in una sola elevazione (onda positiva) o in una sola depressione (onda negativa), l'onda negativa ha una stabilità molto minore della positiva e quindi si propaga a distanze minori. La teoria di queste onde è molto complicata e non si può dire completa neppure dopo i lavori di Robertson, Mac Cowan, Rayleigh, Boussinesq, Gwyther. In prima approssimazione si può assumere che sia:

$$V = \sqrt{g h'}$$

dove V è la velocità di propagazione, ed h' l'ordinata della cresta sul fondo. Le traiettorie delle particelle sono curve aperte, gli elementi liquidi vengono sollevati, portati in avanti e depositati in quiete a distanza finita dalla posizione iniziale; il profilo dell'onda solitaria, simmetrico rispetto alla verticale per la cresta, è asintotico alla linea di livello dell'acqua in quiete, quindi, teoricamente almeno, non si può parlare di una vera e propria lunghezza d'onda.

Di questo tipo di onde si presentano in natura due esempi: le onde sismiche (Hochstetter, Geinitz, Nagaoka) e le « Seebären ». Nel primo caso si forma dapprima un'onda enorme di urto, generalmente positiva, accompagnata talvolta da onde

secondarie; l'onda sismica ha ordinariamente nel primo momento una lunghezza rilevante che può superare i 200-350 km. (640 km. quella del Krakatoa) e un'altezza che può raggiungere i 30 m.; l'onda può propagarsi per più giorni, tutte le modalità dipendendo dalla posizione dell'epicentro, dall'intensità e dalla durata del terremoto ¹⁾. La velocità di queste onde dipende, come ho detto, dalla profondità del mare; infatti esse non si propagano circolarmente intorno al centro di formazione, ma a seconda delle isobate del bacino in cui si propagano; circa però l'applicabilità della formola: $V = \sqrt{gh}$ i pareri sono discordi: mentre secondo Montessu de Ballore e Holden questa formola s'adatterebbe bene in tutti i casi, le onde sismiche osservate durante il terremoto delle Calabrie del 1905, secondo Platania, avrebbero avuto una velocità di $113-115 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$, velocità alquanto minore della teorica. Tale fatto venne riscontrato anche altrove: per esempio dall'Honda nelle onde sismiche del Pacifico; e, secondo il Davison, deve dipendere dalle alterazioni che esse subiscono quando il fondo non sia piano, alterazioni che devono produrre una diminuzione di velocità.

Queste onde, taluni sostengono, non sono causate dall'urto della costa, ma piuttosto da scoscendimenti sottomarini, perchè molti terremoti costieri violentissimi non furono accompagnati da fenomeni consimili. Le onde sismiche si possono generare anche in mare aperto; tipica al riguardo è nell'Atlantico la località: 50° lat. N, 30° long. W, dove si generò nel 1887 la cosiddetta onda dell'« Umbria » (dalla nave cui recò i massimi danni) e donde partirono nel 1891 e nel 1894 onde consimili; in quella località, secondo i rilievi fatti dalla nave telegrafica « Faraday », esiste una montagna sottomarina alta 1800 metri.

Le « Seebären », onde solitarie che si manifestano molto raramente ²⁾ in alcuni bacini del Baltico meridionale senza

1) Ecco l'altezza dell'onda sismica del Krakatoa a diverse distanze dal punto di generazione: Krakatoa m. 36; Giava m. 2, Ceylon m. 1,2; Capo di Buona Speranza m. 0,25.

2) Dal 1755 al 1888 si ebbero sulle spiagge della Pomerania e del Mecklenburgo 15 « Seebären » e 6 se ne ebbero sulle coste russe.

causa locale apparente, sono di dimensioni molto minori che non le onde sismiche; secondo le ricerche di Credner, Günther, Kämtz, Muschketow, Hahn, Rudolph e Doss, la « Seebär » è da ricondursi a cause puramente meteorologiche: colpi di vento, formazione o modificazione brusca di aree cicloniche, trombe marine ecc., poichè è sempre accompagnata da venti forti e a colpi, da pioggia, neve o grandine ¹⁾.

6. *Misura delle onde.* Gli elementi dell' onda più importanti per la teoria e per la pratica sono:

Lunghezza (λ) = distanza fra due creste consecutive,

Altezza (H) = dislivello fra cresta e cavo,

Velocità (V) = spazio percorso dalla cresta in un secondo,

Periodo (D) = intervallo di tempo fra i passaggi di due creste successive per la stessa verticale.

I vari osservatori non determinarono in generale direttamente tutti questi elementi, ma parte ne dedussero giovandosi delle relazioni teoriche:

$$V = \frac{\lambda}{T} = \frac{g}{2\pi} T = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}},$$

$$T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} = \frac{2\pi}{g} V,$$

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 = \frac{2\pi}{g} V^2.$$

La *lunghezza* si suole misurare:

I) contando il numero di onde che sono fra due oggetti a distanza nota: α) o due navi viaggianti di conserva (Wilkes); β) o due gavitelli (Walker, Shield);

II) determinando la lunghezza del cavo necessario per filare da poppa un galleggiante in modo che, quando l' onda è da poppa, galleggiante e poppa si trovino su due creste consecutive (Stanley, Bertin);

III) misurando il periodo T dell' onda e il tempo t che una cresta impiega a percorrere la lunghezza L della nave;

1) Dapprima si credevano di origine sismica perchè la « Seebär » di Lubecca coincisette col terremoto di Lisbona.

se θ è l'angolo fra la rotta e la direzione delle onde sarà (Abercromby)

$$\lambda = L \frac{T}{t} \cos \theta .$$

Di questi metodi il migliore è il I β , ma è usabile solo a terra, il II sarebbe comodo, ma è poco usato e meriterebbe un controllo accurato sulla sua applicabilità.

L'*altezza* si misura:

I) determinando a che punto dell'alberatura di una nave nota arriva l'orizzontale tangente alla cresta dell'onda (Wilkes);

II) determinando, quando la nave stia nel cavo dell'onda, a che altezza bisogna salire sull'alberatura affinchè la visuale orizzontale sia tangente alla cresta dell'onda stessa (Sommerville); se la nave sbanda o inclina, occorrerà un secondo osservatore che determini l'angolo di sbandamento o d'inclinazione per calcolare le opportune correzioni (Arago);

III) leggendo le indicazioni di un barometro aneroide sensibile collocato sul ponte della nave (Abercromby, Schott); è difficile in queste misure determinare la vera altezza dello strumento sull'acqua;

IV) misurando, come si usò a bordo della « Novara », gli angoli di salita o di discesa della nave sull'onda, e la lunghezza di questa, allora si ha: $H = \frac{1}{2} L \tan \alpha$;

in tutti questi metodi si ammette implicitamente che la nave segua esattamente l'onda, mentre questo, per le navi lunghe specialmente, non avviene mai; raramente infatti, afferma il Rottok, la prua o la poppa si sollevano per più di tre metri; i due primi metodi poi ad ogni modo valgono solo per onde molto alte e quando si osservi da navi a bordi bassi;

V) leggendo i livelli della cresta e del cavo o su un mareografo opportunamente modificato (Merrifield); o su una pertica graduata fissata al fondo del mare (Moorsom, Shield), oppure ad una tavola orizzontale a mezz'acqua convenientemente ancorata (Froude); questi servono però soltanto vicino a terra ;

VI) mediante l'apparecchio di Paris, il quale consta di una lunga pertica di legno, che, grazie a un contrappeso, galleggia verticalmente senza seguire il moto ondoso; lungo questa pertica, la quale funziona da massa stazionaria, corre un leggero galleggiante anulare di cui si leggono le posizioni lungo la pertica; c'è da dubitare però che per onde molto lente o molto lunghe, la massa della pertica non sia abbastanza stazionaria.

La misura della *velocità* di propagazione si effettua determinando il tempo impiegato da una cresta a percorrere la distanza, o fra due gavitelli in posizione nota (Wilkes, Walker, Sield), o fra un galleggiante filato da poppa con una sagola di lunghezza nota, e la nave (Nautical Magazine, Stanley, Arago), o fra due ordinate a distanza l sulla nave stessa (Abercromby); in questo caso, usando le solite notazioni, sarà:

$$V = \left(\frac{l}{t} \pm v \right) \cos \theta .$$

Il *periodo* infine si misura :

I) contando il numero di creste che giungono da prua o da poppa alla nave in un dato tempo, oppure che passano in un dato tempo per una data ordinata della nave (Atlmayr); si ha allora un periodo apparente P che è legato a λ , V , v dalla relazione:

$$\lambda = (V - v \cdot \cos \theta) P ;$$

per calcolare il periodo vero T , occorrerà ricorrere alle relazioni teoriche:

$$\lambda = V \cdot T \quad V = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} ,$$

da queste tre formule eliminando V e λ avremo :

$$T = \frac{P}{2} + \sqrt{\left(\frac{P}{2}\right)^2 - \frac{2\pi v \cos \theta \cdot P}{g}} ;$$

II) determinando il periodo d'oscillazione di un galleggiante qualunque che non dia presa al vento (Report. Brit. Ass. 1869);

III) osservando il frangersi dell'onda a riva (Stokes).

Un metodo che sembra destinato a risolvere completamente il problema delle misure degli elementi principali del moto ondoso è quello « stereofotogrametrico » proposto dall'Ammiraglio Rottok: Si prendono delle fotografie delle onde simultaneamente mediante due apparecchi fotografici identici posti a distanza nota che funzionerà da base, poi, mediante lo stereocomparatore *Pulfrich-Zeiss*, si rilevano le posizioni di ogni punto e si traccia così il rilievo esatto della superficie liquida. Non è necessario attendere che gli assi dei due obbiettivi siano orizzontali perchè, conoscendo l'angolo d'inclinazione, si potrà sempre calcolare l'opportuna correzione; ad ogni modo è bene far agire gli otturatori quando questa condizione è quasi soddisfatta; uniche condizioni richieste da questo metodo sono le solite necessarie nei rilievi fotogrammetrici, condizioni non difficili da realizzare a bordo. Gli errori nella determinazione di λ sono proporzionali direttamente al quadrato della distanza a cui si mira e inversamente alla lunghezza della base; gli errori nella determinazione dell'altezza dell'onda sono indipendenti dalla base e variano poco colla distanza a cui si mira; con una base di 10 m., si ha per λ un errore massimo del 4 ‰ e per H del 2 ‰. Il periodo e la velocità vanno determinati a parte.

7. *Risultati delle misure finora effettuate.* Il materiale d'osservazione finora raccolto è abbondante, ma discorde, poco ordinato e relativamente in generale poco recente. Facendo la media delle osservazioni finora effettuate e meritevoli di fiducia si può dire che, per le onde generate dal vento nell'Oceano, si ha:

λ minima	60 m.	T minimo	5",8	V minima	7 $\frac{\text{m}}{\text{sec}}$.
λ media	145 m.	T medio	9",7	V media	13 $\frac{\text{m}}{\text{sec}}$.
λ massima	230 m.	T massimo	17"	V massima	24,2 $\frac{\text{m}}{\text{sec}}$.
λ eccezionale	800 m.	T eccezionale	24"	V eccezionale	34,8 $\frac{\text{m}}{\text{sec}}$.

Circa l'altezza massima raggiunta dalle onde marine si sono accese vivaci polemiche e la cosa è ancora indecisa: molti (d'Urville, Fitz Roy, Kiddle ecc.) sostengono di avere osservate altezze di 30 m., Cornish e Schott arrivano solo a 10-12 m., Abercromby a 14 m., e l'« Hydrographical Bureau S. U. A. » fino a 16 m. Qui ci troviamo di fronte alle solite difficoltà della fisica terrestre: come si può dar ragione agli uni piuttosto che agli altri? tutto dipende dalle condizioni del fenomeno che ciasun osservatore ha studiato e il non aver noi osservato un dato fatto non ci autorizza a dubitare che altri l'abbia per conto suo osservato.

Nel Mediterraneo l'altezza d'onda massima osservata (Cialdi) è di 5 metri.

Interessante, dal punto di vista teorico, è il rapporto dell'altezza alla lunghezza dell'onda; secondo i dati raccolti da Stanley questo rapporto sarebbe 0,08, secondo quelli riportati dal Cialdi e secondo le osservazioni di Schott sarebbe 0,06, secondo infine le misure di Paris, calcolate da Krümmel si avrebbe:

$$\begin{array}{l} H = \left| \begin{array}{c|c|c|c|c|c} 1,6 & 2,4 & 4,1 & 5,1 & 7,8 & \text{metri} \end{array} \right. \\ \frac{H}{\lambda} = \left| \begin{array}{c|c|c|c|c|c} 0,026 & 0,031 & 0,034 & 0,048 & 0,052 & \end{array} \right|, \end{array}$$

cioè il rapporto $\frac{H}{\lambda}$ crescerebbe al crescere di H.

Riguardo alla relazione fra l'intensità del vento $\left(\text{in } \frac{\text{m}}{\text{sec}}\right)$ e le dimensioni delle onde, in generale si può dire che H e λ crescono col tiro del vento; da principio cresce di più H, poi accade il viceversa e in definitiva è λ che subisce il massimo aumento. Le leggi trovate sono molto diverse le une dalle altre, ad ogni modo è bene notare che l'aumento non è continuo, dopo un certo tempo H e λ rimangono stazionarie e allora ecco i risultati cui giungono i vari autori:

Valori del rapporto $\frac{v}{H}$ (v = velocità del vento)

	Couvent Desbois	Paris	Wilson Barker
Uragano	8,7	7,8	8,5
Tempesta forte	6,3	5,1	7,0
Tempesta	4,7	—	4,3
Brezza forte	3,3	—	2,4

$$\text{Antoine : } H = 0,75 \cdot v^{\frac{2}{3}} \lambda = 30 \cdot v^{\frac{1}{2}} ;$$

$$\text{Cornish : } \frac{v}{H} = 3,1 \left(\text{per } v \text{ da } 2,5 \text{ a } 25,9 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \right) ;$$

$$\text{Babron : } H = \frac{1}{4} v ;$$

$$\text{Krümmel : } H = \frac{1}{2} v ;$$

finalmente i marinai americani sostengono che è :

$$H = 0,85 \cdot v ;$$

naturalmente ogni autore trova dei casi in cui la sua legge è verificata. La questione è da riguardarsi come insoluta e, posta in questi termini, forse anche oziosa, perchè la difficoltà sta nel tenere il dovuto conto delle dimensioni del bacino in cui si osserva e soprattutto del tempo per cui antecedentemente ha soffiato il vento; secondo il Cialdi, per esempio, un vento fortissimo in un bacino stretto non lascia sviluppare onde di un'altezza molto grande.

Il Cornish afferma che perchè le onde raggiungano il loro massimo sviluppo occorre che il tiro del vento sia almeno 2000 volte la lunghezza dell'onda; fra la velocità del vento e quella delle onde singole egli trova che nei moti ondosi generati dalle grandi depressioni ¹⁾ nell'Atlantico vi è eguaglianza e che inoltre un gruppo di onde viaggia colla velocità della depressione stessa: infatti, in acqua profonda, la velocità di

1) Teoricamente il problema è stato recentissimamente trattato dal Sig. Ekmann.

un gruppo è metà (Rayleigh, Reynolds) di quella di un'onda sola e d'altra parte la velocità del vento è in generale all'incirca doppia di quella della depressione. Secondo Paris invece si avrebbe:

$$V = \text{da } 1,59 \cdot v \text{ a } 1,11 \cdot v \text{ per venti da } 6 \text{ a } 12,5 \frac{\text{m}}{\text{sec}},$$

$$V = \text{da } 0,80 \cdot v \text{ a } 0,76 \cdot v \text{ per venti da } 12,5 \text{ a } 21,6 \frac{\text{m}}{\text{sec}};$$

Schott infine dice che il vento ha una velocità sempre maggiore dell'onda nel rapporto:

$$V = 0,76 \cdot v,$$

e per spiegare il fenomeno delle onde libere, che arrivano prima del vento, ricorda che questo nelle depressioni percorre una traiettoria spirale, mentre le onde partono tangenzialmente alle isobare e si propagano in linea retta. Si vede quindi come sarebbe interessante il collegare lo studio delle onde con quello della situazione isobarica.

Dati numerici sulle onde nei laghi sono rarissimi e si riferiscono quasi esclusivamente al lago di Ginevra: secondo Forel le onde di questo lago hanno le caratteristiche medie seguenti: $T = 5''$, $V = 7,8 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$, $\lambda = 39 \text{ m}$.

III. Onde stazionarie.

8. *Onde stazionarie nel mare.* Le onde stazionarie si presentano in natura per lo più nei bacini un po' chiusi e quindi nei mari interni, nei golfi e nei laghi.

Uno dei casi in cui in mare si hanno tali onde è quando le onde senza vento battono contro una parete verticale; allora non si frangono, si riflettono e formano quel sistema di onde stazionarie che i francesi chiamano « clapotis » (Bertin).

Ad onde stazionarie sono forse dovute quelle alterazioni delle registrazioni mareografiche che si manifestano in molti luoghi sotto forma di oscillazioni di piccola ampiezza e quindi non osservabili direttamente, il cui periodo è da 30 a 40 volte circa quello delle onde solite di vento e $\frac{1}{30}$ circa di quello della

marea ordinaria. Questi moti ondulatori o « librazioni » del mare non si manifestano in modo continuo e regolare, ma compaiono in serie la cui durata sembra dipendere, secondo Platania, dalle variazioni e dalla distribuzione della pressione. In generale l'ampiezza arriva al massimo a pochi centimetri, così a Catania (Platania), a Ragusa (v. Sterneek), a Napoli e ad Ischia (Grablovitz), a Porto Corsini e ad Ancona (Magrini); in alcuni luoghi invece le « librazioni » possono raggiungere delle ampiezze notevoli, così sulle coste occidentali della Sicilia, dove il fenomeno ha ricevuto il nome di « Marrobbio » e venne per la prima volta studiato dallo Smyth, poi dal Fischer e infine dal Platania. Secondo le descrizioni riportate sembra fuor di dubbio che il fenomeno del « Marrobbio » debba ascrivarsi a cause puramente meteorologiche, tanto che dai marinai locali si ritiene come foriero di cambiamento di tempo; così certe librazioni del Tirreno sulle coste della Toscana non sarebbero che onde stazionarie preannuncianti il Libeccio (Bertelli). Secondo altri queste ondulazioni sarebbero dovute a fenomeni sismici, ma l'ipotesi non pare giustificata perchè spesso (Platania) le librazioni dovute evidentemente a cause meteorologiche sono di ampiezze maggiori di quelle corrispondenti a terremoti.

Anche ad onde stazionarie sono dovute, secondo Supan, le oscillazioni che susseguono alle « Seebären »; così si spiega pure, secondo Forel, Miallis e Krümmel il fenomeno di « Euripo »; onde stazionarie, secondo Airy, si riscontrano fra la Sicilia e la costa Africana specialmente nelle vicinanze delle isole Maltesi, e tali sarebbero pure, secondo Russel, le librazioni osservate a Sydney ed a Newcastle in Australia, la cui causa sarebbe il passaggio di forti depressioni nello stretto di Bass o nel mare di Tasmania.

Un fenomeno simile è quello delle oscillazioni del mare in certe baie del Giappone; il loro periodo dominante è dato abbastanza bene dalla formola:

$$T = \frac{4L}{\sqrt{hg}},$$

essendo L la lunghezza della baia ed h la sua profondità media. Da principio si credevano vere sesse, ma essendo le fasi le stesse nei differenti punti della baia e alla bocca di essa avendosi una linea nodale, la spiegazione cadde; Honda, Joshida e Terada credono invece ad una vera e propria risonanza dell'acqua della baia per un'eccitazione proveniente dal largo sulla cui origine non si pronunciano affatto ¹⁾. Secondo Wegemann, anche le librazioni osservate sulle coste del Mediterraneo sarebbero dovute a fenomeni di risonanza delle baie e dei golfi; l'eccitazione sarebbe da ricercarsi nell'onda-marea, pure avvertendo che quanto è più ampia questa, tanto meno marcate sono le librazioni e che l'intensità e la direzione del vento esercitano una grande influenza sulla loro ampiezza; è da osservare inoltre che in queste risonanze, forse dovute all'onda-marea, i periodi durante la marea ascendente non sono uguali a quelli durante la marea discendente: così a Messina e a Jarmouth (Duff).

Noto di passaggio che, secondo Darwin, l'ampiezza rilevante della marea a Venezia sarebbe dovuta pure a un fenomeno di risonanza idraulica di tutto l'Adriatico per l'onda-marea del Mediterraneo.

Il problema delle cause di questi fenomeni è molto difficile; certo il periodo loro dipende dalle dimensioni del bacino in cui avvengono, ma, tranne in alcuni casi rari di baie e di golfi a imboccatura stretta, pei quali si potrà, come hanno fatto Honda e Terada, analogamente al problema acustico, calcolare anche la correzione per l'apertura, sarà difficile applicare in questo caso i risultati della teoria delle vere e proprie sesse; ad ogni modo quanto si è detto basta a far rigettare l'altra spiegazione del Denison, secondo la quale questi fenomeni sarebbero dovuti alle onde atmosferiche di Helmholtz. Mancano però in argomento ricerche teoriche e sperimentali esaurienti; le osservazioni sulle nostre coste vennero studiate finora specialmente dal Magrini e dal Platania.

1) Napier Denison le credeva onde lunghe provenienti dall'Oceano, ma quando si scoprì che il loro periodo dipendeva dalle dimensioni della baia la sua spiegazione cadde.

9. *Sesse*. Le sesse sono oscillazioni stazionarie della massa d'acqua di un lago: a seconda che si hanno una o più linee nodali, e che queste sono disposte secondo la larghezza o la lunghezza del lago, le sesse si chiamano uni- o plurinodali, longitudinali o trasversali. Gli elementi di una sessa sono il *periodo*, ossia l'intervallo di tempo fra due alti livelli successivi e l'*ampiezza* ossia lo spostamento verticale delle particelle liquide ai venti. Talvolta possono coesistere e interferire due sesse di periodo diverso, allora si hanno le sesse *dicrote*; in quasi tutti i laghi si riscontrò la presenza di più sesse di diverso periodo: fino a 5 nei laghi Starnberg e Neuchatel, 6 in Hakone Madi, 10 nel lago dei Quattro Cantoni, 13 nel Chiemsee e 28 nel lago Biwa.

I tracciati limnografici nei grandi laghi dell'America del Nord sono complicati dalla presenza di vere e proprie maree (Graham, Ferrel); l'esistenza di sesse anche in essi venne però posta fuori di dubbio dalle ricerche recenti di Wheeler e di Henry.

In generale nei limnografi si usano sistemi analoghi a quelli usati nei mareografi; i vari apparecchi di Forel, Plantamour, Chrystal, Sarasin e quello « Giapponese » differiscono solo nel modo di trasmettere il moto del galleggiante alla penna scrivente; diverso è lo « statolimnografo » del Chrystal nel quale si misurano le variazioni di pressione in un certo volume d'aria chiuso in un vaso, per metà immerso nell'acqua, il cui fondo è in comunicazione colla solita doccia.

Teoricamente il problema fondamentale delle sesse è: determinare il periodo in funzione delle dimensioni del lago; problema che ai teorici puri potrà offrire il campo, come suggerì il Volterra, di applicare quei recenti metodi analitici basati sulla considerazione di certi determinanti infiniti che tante utili applicazioni trovano nell'analisi e nella fisica matematica.

Lasciando da parte gli studi teorici puri, così quelli di Kirchhoff, Lechat, St. Venant, Greenhill ecc., le formole più importanti date per confronto coi dati d'osservazione sono:

Autore	Ipotesi poste a base del calcolo	Formola
Merian	Bacino rettangolare di profondità h uniforme e di lunghezza l .	$T = \sqrt{\frac{\pi l}{g} \frac{e^{\frac{2\pi h}{l}} + 1}{e^{\frac{2\pi h}{l}} - 1}}$
Guthrie	Bacino rettangolare di profondità h molto grande e di lunghezza l .	$T = \sqrt{\frac{\pi l}{g}}$
Thomson	Bacino rettangolare di lunghezza l molto grande rispetto alla profondità uniforme h .	$T = \frac{l}{\sqrt{gh}}$
Du Boys	Bacino di forma e profondità qualunque. Si divida la lunghezza in n parti e si chiami S_i l'ascissa del punto i -esimo ed h_i la profondità corrispondente.	$T = \frac{2}{\sqrt{g}} \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\sqrt{h_i} + \sqrt{h_{i+1}}}$
Chrystal	Bacino a profilo longitudinale parabolico concavo verso l'alto, h = profondità massima, l = lunghezza.	$T_n = \frac{\pi l}{\sqrt{n(n+1)gh}}$

Naturalmente le prime tre formule, partendo da ipotesi che in pratica non si verificano, non hanno dato buoni risultati, non sapendosi bene, anche in lago di cui si conosca esattamente la batometria, che cosa sostituire ad h e ad l . La formula di Du Boys ha dato buoni risultati applicata a tutti i laghi finora studiati. Risultati ancora migliori sembra destinata a dare la formola del Chrystal; pel caso di un fondo parabolico convesso essa dà:

$$T_1 = \frac{\pi l}{\sqrt{2,77.gh}} \quad T_2 = \frac{\pi l}{\sqrt{12,34.gh}}.$$

In generale il Chrystal considera il profilo di un lago come un sistema di due cerchi parabolici di parametro diverso, recantisi nel punto di massima profondità.

I primi ad occuparsi sperimentalmente di questa specie di onde furono i fratelli Weber, dopo il Forel il quale conchiuse dalle sue esperienze che il periodo è indipendente dall'ampiezza, cresce colla lunghezza del bacino e diminuisce colla profondità e che l'ampiezza è maggiore dove è minore la profondità e dove il bacino è più stretto. Meno importanti per la fisica terrestre sono gli esperimenti di Kolacek sui bacini cilindrici, di Lechat e Guthrie sui bacini rettangolari e di Kirchhoff e Hansemann sui bacini prismatici. Recentemente White e Watson hanno verificata la teoria di Chrystal in tutti quei casi [fondo parabolico concavo e convesso, piano (orizzontale o inclinato) e a quartica] in cui si ha una soluzione semplice. La corrispondenza fra teoria ed esperienza fu trovata perfetta riguardo ai periodi; entro gli errori sperimentali, riguardo alla posizione delle linee nodali; le sesse più persistenti furono quelle ottenute col fondo a quartica.

Circa il rapporto r fra i periodi delle sesse uninodale e binodale, il Soret, discutendo la formola di Merian, aveva trovato:

$$\begin{array}{llll} \text{per un bacino di profondità } \infty & ; & r = 1,414, \\ \text{»} & \text{»} & \text{»} & 0 & ; & r = 2; \end{array}$$

invece Forel, per via sperimentale, ha conchiuso:

$$\begin{array}{llll} \text{in bacino poco profondo } & r > 2, \\ \text{»} & \text{»} & \text{molto} & \text{»} & r < 2; \end{array}$$

il Chrystal finalmente ha trovato:

$$\begin{array}{llll} \text{per fondo parabolico concavo } & r = 1,73, \\ \text{»} & \text{»} & \text{»} & \text{convesso } & r = 2,11; \end{array}$$

Confrontando fra loro le caratteristiche dei laghi finora studiati, si vede che tutte le ipotesi su un effetto della profon-

dità o della lunghezza sul valore di r cadono ¹⁾; resterebbe a vedere se, come consegue dalla teoria di Chrystal, l'essere r maggiore o minore di 2 dipende dalla concavità o convessità del fondo (teoricamente ci si potrebbe domandare a che corrisponde il caso di $r=2$; il caso del lago di Ginevra sembrerebbe dargli ragione).

La primitiva idea, che le sesse fossero esclusivamente di origine sismica, venne dimostrata inattendibile dalle osservazioni di Forel; i primi a riconoscere l'origine meteorologica di quasi tutte le sesse furono Saussure, Vaucher e poi lo Stabrowski; ora conviene ammettere col Günther che le sesse possono eccezionalmente essere prodotte da fenomeni sismici o da variazioni del rilievo del fondo, ma di regola esse sono dovute a perturbazioni atmosferiche, venti ciclonali o discendenti che premono variamente sull'acqua o la sospingono da una parte del lago: è da notare però che solo in casi rarissimi si può precisare la causa particolare di ogni gruppo di sesse; per esempio, è molto difficile il caso del lago di Bolsena ove le serie di sesse (Palazzo) si susseguono quasi ininterrottamente.

IV. *Conclusione.*

10. *Onde.* Da quanto ho esposto spero si sia rilevato come il problema della determinazione del moto ondoso possa essere ancora una inesauribile fonte di promettenti ricerche e dal lato teorico, nel quale i mezzi recentemente acquisiti dall'analisi offrono un campo di lavoro straordinariamente fecondo, e dal lato sperimentale e d'osservazione, nel quale la perfezione raggiunta dagli odierni strumenti promette un rigore ben più grande di quello finora conseguito.

Volendo avviarsi seriamente alla soluzione del difficile problema delle onde progressive, bisognerà fare quello che occorrerebbe in tante altre questioni della Fisica terrestre: cominciare quasi da capo, eseguendo con metodo tutta una nuova serie di osservazioni ordinate. La prima determinazione

1) Ecco i valori di r per alcuni dei laghi più importanti: Chiemsee 1,48; Madi 1,77; Quattro Cantoni 1,82; Garda 1,90; Costanza 1,93; Balaton 1,95; Thun 2,00; Ginevra 2,06; Hakone 2,26.

dovrebbe essere quella *simultanea di tutti gli elementi su una stessa serie di onde*; cosa fin qui mai effettuata con rigore: il metodo stereofotogrammetrico che consente, senza derogare molto nell'esattezza, di fotografare su una lastra 13 X 18 una lunghezza di un miglio marino, promette di rendere possibile tale operazione senza richiedere l'intervento di un numero troppo grande di osservatori e di permettere di attaccare seriamente il problema della forma delle onde naturali e della inalterabilità della medesima, questione ancora tutta da risolvere e importantissima per decidere sull'esistenza o meno di una tal forma invariabile. Certo la forma trocoidale soddisfa alle condizioni idrodinamiche per onde che si formino su una superficie libera, ma alla superficie limite fra aria ed acqua? Il Laas, che ha fatto alcune misure riuscitissime col metodo stereofotogrammetrico a bordo del « Preussen », ha potuto dimostrare che la forma delle onde da lui osservate è molto diversa da quella assegnata dalla teoria trocoidale; misure di tal genere si sono pure effettuate parzialmente nella campagna oceanica nella nave germanica « Planet »; i risultati non si conoscono ancora, ma si può dubitare siano completi, perchè troppi erano gli studi da compiersi a bordo durante la campagna.

Un'altra questione importante, riguardo alla quale non c'è materiale d'osservazione diretto, ma solo delle deduzioni più o meno giustificate, è quella di sapere quando e in che modo il moto ondoso è accompagnato da moto di trasporto; come negarne l'esistenza se nella genesi stessa delle onde esso si manifesta indubbiamente? eppure nessun tentativo venne fatto per determinare questo moto di trasporto. Nelle onde libere esso non esiste forse, ma nelle onde di vento non può non presentare un'importanza grandissima anche per la pratica della navigazione; occorrerebbe quindi sapere in che rapporto d'entità stanno fra loro i due moti ondoso e di trasporto. A questo proposito noterò come si potrebbero ottenere interessanti risultati colla cinematografia di galleggianti, con che potremo forse renderci ragione del moto delle particelle alla superficie del mare e delle leggi secondo le quali i galleggianti seguono il moto delle onde; a me non consta siano state ese-

guite esperienze sistematiche al riguardo e d'altronde i metodi giroscopici di Piazz-Smyth, oscillografici di Froude e Russo e a livello liquido di Normand si riferiscono a questioni speciali d'ingegneria navale e non possono portare che scarsa luce su questo problema.

Non si può passare sotto silenzio il problema della determinazione del moto ondoso e della sua propagazione a varia profondità sotto la superficie dell'acqua, questione che si presenta in tanti problemi di architettura navale e idraulica e che è ancora del tutto controversa: la teoria trocoidale dice che il raggio r dell'orbita circolare (in acqua ∞ profonda) decresce secondo la legge:

$$r = \frac{1}{2} H e^{-\frac{2\pi h}{\lambda}},$$

essendo h la profondità del punto, λ la lunghezza ed H l'altezza dell'onda alla superficie; quindi sarebbe $r=0$ solo per $h=\infty$, ma il moto cesserebbe di essere sensibile per $h=2\lambda$. Gli sperimentatori (Weber) dicono che il moto si propaga fino a 350 volte l'altezza dell'onda (fino a 3500 m. per onde alte 10 m!); gli osservatori poi sono completamente discordi: come si può osservare il moto ondoso a varie profondità?: si può osservarlo indirettamente dalla disposizione della sabbia sul fondo o dei depositi animali e vegetali su oggetti immersi, oppure dal frangersi delle onde, che avviene generalmente là dove la parte inferiore dei moti orbitali delle particelle viene impedita. L'osservazione diretta invece può farsi con uno dei metodi suggeriti dall'Aimé:

I) Nel mezzo di una lastra di piombo, deposta sul fondo del mare, è attaccata con uno spago una palla di legno munita di punte di ferro; se c'è moto sufficiente la palla viene a battere sulla lastra di piombo e segna colle punte delle tacche visibili simmetriche;

II) Si affonda nel mare un recipiente conico, con un forellino al vertice ed uno alla base; in esso è contenuta una sostanza più leggera dell'acqua, aria, olio colorato, ecc.; e si osserva la traiettoria delle bolle d'aria e delle gocce.

Il primo metodo serve per grandi profondità, il secondo solo in acqua bassa; dall'osservazione diretta è risultato che onde alte tre metri si facevano sentire fino a 40 m. di profondità (Aimé); coll'osservazione indiretta si riscontrò movimento fino a 200 metri.

Questo in generale; se si scende a questioni più particolareggiate, i problemi ancora insoluti si moltiplicano; per esempio:

1) Le onde libere o fiotti residui di tempesta hanno dei periodi diversi nelle diverse regioni; c'è qualche relazione fra questi periodi e quelli delle librazioni e quindi con la configurazione dei mari in cui si osservano?

2) In che modo si influenzano mutualmente onde libere residue e onde di vento?

3) Che modificazioni subiscono le onde nell'attraversare una corrente?

4) Che relazioni esistono fra i vari elementi del moto ondoso?

5) È verificata la relazione:

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} + 4\pi^2 \frac{H^2}{\lambda^3}},$$

assegnata dal Rayleigh?

Inoltre molte teorie richiedono ancora una verifica sperimentale o il confronto con dati d'osservazione degni di fiducia, per es.: la teoria di Helmholtz e Wien sulle onde di vento. Così pure molte leggi empiriche richiederebbero di essere verificate anche in località diverse da quelle in cui le verificarono i loro scopritori: per es. quelle di Stevenson. Questi su osservazioni fatte a Scarborough ha costruito la formola empirica:

$$H = \frac{3}{4} + \frac{1}{3} D^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{4} D^{\frac{1}{4}} \quad (\text{tutto espresso in metri})$$

che dovrebbe dare l'altezza massima H dell'onda al largo, quando il vento soffia da terra, in funzione della distanza D fra l'onda e la riva. Lo stesso Stevenson trova che l'onda si

rompe quando la profondità sotto il cavo è due volte l'altezza e che onde di altezza H_0 , entrando in un porto avente la larghezza B nel punto in cui si osserva, ad una distanza D dall'imboccatura che si suppone avere una larghezza b , si riducono ad un'altezza H secondo la formola:

$$H = H_0 \left\{ \frac{b^{\frac{1}{2}}}{B^{\frac{1}{2}}} - \frac{D^{\frac{1}{4}}}{50} \left(1 - \frac{b^{\frac{1}{2}}}{B^{\frac{1}{2}}} \right) \right\},$$

tutto espresso in piedi inglesi, e l'autore conclude che per avere una forte riduzione di H è bene che il porto abbia un contorno ellittico con un foco all'imboccatura ed uno in terra al di là della linea d'alta marea. Lo Stevenson trova di più che l'onda deflessa al di là di un rompionde si riduce d'altezza nel rapporto:

$$1 - 0,06 \cdot \alpha,$$

α essendo l'angolo di deflessione. Di tutte queste leggi sarebbe da tentarsi una verifica sperimentale e la ricerca di una ragione teorica.

Interessante sarebbe poi la determinazione dell'energia del moto ondoso, per esempio col metodo dello stesso Stevenson, impiegando cioè un dinamometro a molla a pressione, e l'indagine della legge secondo la quale questo urto diminuisce quando si espone l'apparecchio sotto il livello medio del mare in quiete ¹⁾.

Un fenomeno importante, da ricercare nelle nostre acque, sarebbe quello del « Dodwand » o delle « acque morte »; secondo Nansen questo fenomeno si manifesta con un'improvvisa diminuzione di velocità di una nave che navighi nel « Dodwand » e con una diminuzione di governabilità col timone. Secondo Bjerknes ciò sarebbe dovuto alla formazione, intorno alla nave, di onde alla superficie limite fra acqua salsa e acqua dolce. Il Walfrid ha raccolto un materiale d'os-

1) Degno d'attenzione sarebbe vedere se sia vero il fatto, osservato forse da Phipps e ammesso come possibile da Joule, che il mare ondoso abbia una temperatura sensibilmente superiore a quella che ha quando si trova in quiete.

servazione sufficiente ad attestare l'attendibilità dell'ipotesi del Bjerknes: il fenomeno si manifesta infatti nelle insenature o lungo le coste ove si versano in mare fiumi in condizioni che il miscuglio fra acqua dolce e salata non si faccia rapidamente, così nei fjordi della Norvegia, all'imboccatura dell'Orenoco e del Congo, nella baia di Vancouver e lungo il Labrador. Una nave viene allora a trovarsi inferiormente in acqua salata, superiormente in acqua dolce; col suo moto genera alla superficie limite fra i due liquidi delle onde che ne impediscono il moto; la nave trascina con sé uno strato d'acqua dolce tale, che non può più governare perchè il timone viene a trovarsi quasi totalmente nell'acqua dolce che si muove colla nave stessa.

Infine, specialmente importante sarebbe lo studiare le onde libere nel Mediterraneo, l'approfondire l'azione della pioggia (Scoresby) e l'influenza delle correnti marine sull'altezza delle onde, cosa quest'ultima che, malgrado gli studi di Möller e Schultz, è ancora poco chiarita.

L'Ammiragliato Germanico ha inteso l'importanza dello studio del moto ondoso e ha provocato l'emanazione di un ordine del giorno (N. 28, 30 Novembre 1903) nel quale si ordina agli ufficiali della marina militare e si fa invito a quelli della marina mercantile di osservare le onde del mare, tracciando un programma completo di studio: *Le osservazioni devono estendersi a velocità, periodo, lunghezza e altezza; i dati raccolti devono essere accompagnati dalla citazione del metodo di misura e dai dati circa: tempo e luogo dell'osservazione, profondità del mare, direzione e forza del vento durante le osservazioni, andamento del tempo prima di esse, direzione delle onde e stato del mare.*

Vorrà il nostro Ministero della Marina imitare l'esempio germanico?

11. *Librazioni.* Riguardo al fenomeno delle librazioni, l'esame dei mareogrammi posseduti dall'Istituto Idrografico della R. Marina permetterà forse di portar luce nella questione, ove però sia accompagnato dall'esame di carte isobariche molto specializzate e compilate su dati degni di fiducia; sarebbe inol-

tre desiderabile che si usassero per questo studio dei mareografi con velocità di carta e amplificazione molto maggiori delle usuali.

12. *Sesse*. Circa le sesse l'osservazione dei periodi, tranne l'acquisizione di un numero caratteristico del lago, non promette di contribuire molto ad approfondire le nostre conoscenze in argomento; vi sono però due problemi il cui studio merita ulteriori osservazioni. Il primo è quello delle sesse chiamate dal Forel « alla quinta », ossia sesse il cui periodo è, nei laghi finora studiati, $\frac{7}{10}$ di quello della sessa uninodale; il secondo è quello della variazione del periodo delle sesse uninodali nei laghi a contorno tondo, come il lago di Bolsena (Palazzo).

Ma oltre lo studio delle cause delle sesse caso per caso, due altre questioni importanti si presentano a chi voglia occuparsi di questi studi: Come si comporta un lago coperto di ghiaccio? nel Chiemsee si sono trovate sesse anche quando era coperto da uno strato di ghiaccio di 30 cm., come si sono prodotte? perchè il periodo fondamentale che è di 43' si riduce allora a 41',6? La seconda questione è quella dello studio delle correnti che si formano nei nodi delle sesse, correnti tutt'altro che trascurabili, raggiungendo esse nel Chiemsee la velocità di 15 metri al secondo!
